

凍土中の不凍水が凍土の圧縮強度に及ぼす影響

THE INFLUENCE OF UNFROZEN WATER ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF FROZEN SOILS

榎戸 源則*・鵜飼 恵三**・永瀬 英生***・亀田 淳二****

By Motonori ENOKIDO, Keizo UGAI, Hideo NAGASE and Junji KAMETA

There were few studies on unfrozen water in frozen soils under 0°C. In order to investigate the relation between unfrozen water and characteristics of frozen soils, unfrozen water contents were measured by the calory metre and calculated by using the specific surface. On Toyoura standard sand and Kaolinite, the measured values were compared with calculated ones. As the results, it became clear that when the temperature fell the unfrozen water contents decreased and the compressive strength increased.

Keywords: unfrozen water, frozen soil, compressive strength

1. まえがき

最近、環境公害問題からクリーンエネルギーである低液化ガスの地下備蓄や薬液注入に代わる地盤凍結工法が注目されるに伴い、土の低温特性に関する研究特に凍土の強度特性についての研究がなされるようになってきた。しかし、未凍土の研究に比べると、凍土の研究はまた緒についたばかりで、その一部分がやっと解明されたに過ぎないと思われる。

本報では、0°C以下の低温になつても一部凍結せずに凍土中に存在する不凍水について、凍土に及ぼす影響を明らかにしようとする。不凍水についての既往の研究はきわめて少ないので、これは、不凍水の測定が困難であり、労力と費用を要するほどには、成果の少ない地味な実験研究であることによると考えられる。しかし、凍土中の不凍水が凍土の性質特にその強度に重大な影響を及ぼすことは、徐々に明らかにされつつある。

不凍水は温度低下とともに減少する。ここでは、豊浦標準砂とカオリンについて、熱量計による直接測定結果と比表面積による間接的計算結果とを比較し、温度および一軸圧縮強度との関係を比較検討した。

なお、本研究は昭和59・60年度文部省科学研究費補助金（一般研究（B）59460140）により実施された一連の研究の一部であり、低温土質工学研究への端緒を与えていただいたことを深く感謝申し上げる。

2. 実験方法および不凍水の測定・計算結果

供試体の作製方法は次のように行う。標準砂は、所定の型枠（円柱形 5 φ × 10 cm）に水と砂とを少量ずつ入れ突き固めと振動を与えながら充填する。カオリンは 420 μm のふるいを通過させた後、所定の含水比になるよう蒸留水を加え、ミキサーで練り返したものをお備密槽に入れ、両面排水で約 72 時間、圧力 4 kgf/cm² で圧密し、整形した後型枠に入れビニール袋で密封する。これらの試料をフリーザー（-100°Cまで冷却可能）に入れ、所定の温度まで急速凍結した³⁾。

（1）熱量計による不凍水の測定

熱量計法は土の熱的諸性質を測定するための信頼性の高い方法である。凍土の試料を熱量計液（水）の中に入れ温度を測定する。用いられた装置は断熱された容器、

* 正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科
(〒376 桐生市天神町1-5-1)

** 正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科
(同上)

*** 正会員 工博 群馬大学助手 工学部建設工学科 (同上)
**** 学生会員 群馬大学大学院工学研究科建設工学専攻
(同上)

攪拌器などであり、特に熱量計として、低温断熱性のよい特殊の容器（デュワー瓶）を使用したので、その信頼性は高いと思われる。凍土中の水がすべて凍結しているとすれば、その水分に相当する熱量を熱量計から吸収するはずである。しかし、実際には、それより少ない熱量しか吸収されない。これは、凍土中の水がすべて凍結しておらず、凍土中に未凍結の水すなわち不凍水が存在しているからであるとみられる。そこで、凍土を熱量計内で融解させたときの温度変化を測定することにより、熱の出入から不凍水量を求める。

熱量計が温度低下によって失った熱量 Q_1 は、水の比熱を 1 とすると

$$Q_1 = (M_1 + W)(T_1 - T_f) \quad (1)$$

土粒子が温度上昇によって得た熱量 Q_2 は、

$$Q_2 = M_2 \cdot C_2 (|T_0| + T_f) \quad (2)$$

不凍水が温度上昇によって得た熱量 Q_3 は、

$$Q_3 = (M - M_2 - M_3) (|T_0| + T_f) \quad (3)$$

氷が温度上昇によって水になり、平衡温度に達するまでに得た熱量 Q_4 は、

$$Q_4 = M_3 (C_3 \cdot |T_0| + 79.7 + T_f) \quad (4)$$

以上の熱の收支は $Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4$ となる。すなわち

$$(M_1 + W)(T_1 - T_f) = M_2 \cdot C_2 (|T_0| + T_f) + (M - M_2 - M_3) \cdot (|T_0| + T_f) + M_3 (C_3 \cdot |T_0| + 79.7 + T_f)$$

ゆえに

$$M_3 = \frac{(M_1 + W)(T_1 - T_f) - [M + M_2(C_2 - 1)](|T_0| + T_f)}{79.7 + (C_3 - 1)|T_0|} \quad (5)$$

ここに、 M ：試料質量 (g), M_1 ：水の質量 (g),

M_2 ：試料の土粒子質量 (g),

M_3 ：試料の水の質量 (g),

M_4 ：試料の不凍水質量 (g),

C_2 ：乾燥土の比熱 (cal/g·°C),

C_3 ：氷の比熱 (0.475 cal/g·°C),

T_0 ：試料温度 (°C), T_1 ：水の温度 (°C),

T_f ：混合後の温度 (°C),

W ：熱量計の熱容量 (cal/°C),

氷の潜熱=79.7 (cal/g)

これから不凍水量は

$$M_4 = M - M_2 - M_3 \quad (6)$$

となる。ここで、熱量計の熱容量は、あらかじめ熱した銅線を熱量計に投入し、平衡後の温度を測ることにより、同じように求められる。

$$W = \frac{M_c \cdot C_c (T_0 - T_f) - 2000 (T_f - T_1)}{T_f - T_1} \quad (7)$$

ここに、 M_c ：銅線の質量 (g), C_c ：銅の比熱 (cal/g·°C), T_0 ：銅線の温度, T_1 ：水温, T_f ：混合後の温度

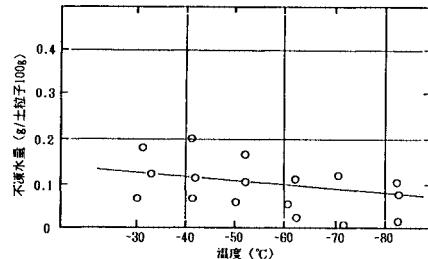


図-1 標準砂の不凍水量と温度（熱量計による）

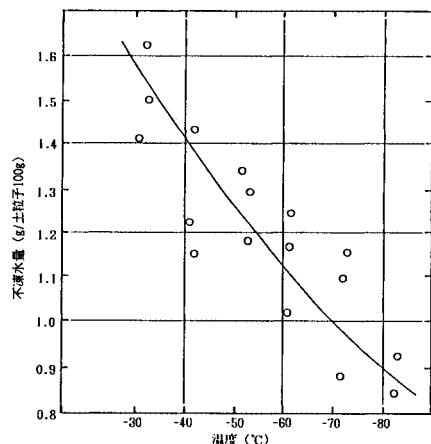


図-2 カオリンの不凍水量と温度（熱量計による）

なお、標準砂とカオリンの比熱を求めた結果は、それぞれ 0.230 (cal/g·°C) と 0.129 (cal/g·°C) の値となつた。

このようにして、-30°C～-80°C における標準砂とカオリンの不凍水量を測定した結果を図-1、図-2 に示す。

(2) 比表面積による不凍水量の計算

試料単位質量中に含まれる土粒子の表面積を比表面積 S (m^2/g) という。比表面積から間接的に不凍水量を求めるには、Anderson および Dillon の実験式を用いる。

比表面積の測定法としては、Brunauer, Emmett および Teller によって開発された BET 法を用いた。BET 法とは吸着ガス（本実験では窒素ガス）を粒子表面に吸着させ、单分子層を形成するに要した量 V_m (mole) および吸着分子 1 個の占有面積 σ から比表面積 S は、

$$S = \sigma \times V_m \times 6.02 \times 10^{23}$$

により求められる。この結果、標準砂およびカオリンの比表面積は、それぞれ 0.31 (m^2/g) および 18.51 (m^2/g) の値が得られた。これらの値を用いて、不凍水分量を計算する。

a) Anderson の実験式による方法¹⁾

$$\ln W_u = 0.2618 + 0.5519 \ln S$$

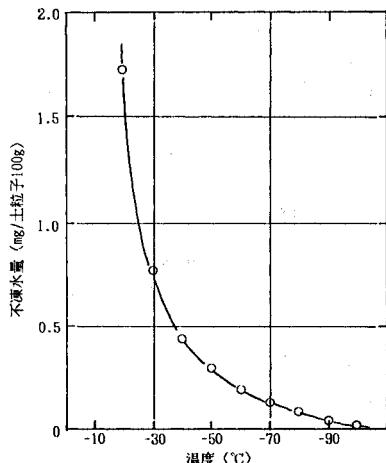


図-3 標準砂の不凍水量と温度 (Anderson の式)

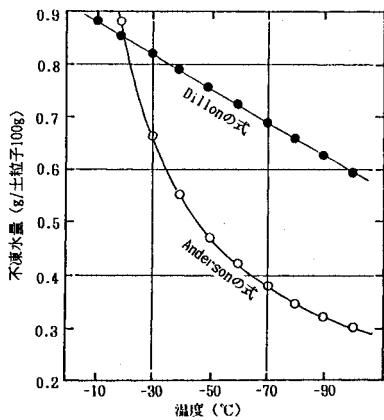


図-4 カオリンの不凍水量と温度（比表面積による）

ここに、

W_u : 不凍水分比 (土粒子 100 g 当たり不凍水量
g/100 g · soil)

S ：比表面積 (m^2/g)

θ : 凍土の温度 (°C)

上式により土の比表面積と温度から不凍水量を求める。

b) Dillon の実験式による方法²⁾

Dillon らは、比表面積と温度、活性度等から不凍水量を算定する次式を提案した。

ただし、

W_u : 不凍水分比 (土粒子 100 g 当たりの不凍水量 g/100 g · soil)

S ：比表面積 (m^2/g)

T :凍土の温度 ($^{\circ}\text{K}$), T_a :氷点 ($^{\circ}\text{K}$)

A_c : 土の活性度 ($= I_s / \% \leq 2 \mu$, I_s : 塑性指数)

$\alpha_{\text{p}} + \text{生} \rightarrow \text{活} \text{性} \text{度}$ (= $\alpha_{\text{p}} / \alpha_{\text{p}}^{\text{生}}$), $\alpha_{\text{p}} + \text{生} \rightarrow \text{活} \text{性} \text{指} \text{数}$)

l : 定数 (比膨潤性粘土 1, 膨潤性粘土 2)

これらの計算結果と温度との関係を図-3 および図-4 に示す。

図-3は標準砂の場合、図-4は、カオリンの場合である。Dillonの実験式は活性度 A_c の値を必要とするが、標準砂について活性度は求められなかつたので、カオリンについてのみ求めた。なお、カオリンの活性度 $A_c = 0.57$ であった。

3. 考察

以上の不凍水量の測定結果について、主として温度および一軸圧縮強度との関係から検討を加える。

(1) 不凍水量と温度との関係

熱量計により測定された不凍水量は、図-1 および図-2 から明らかなように、標準砂の場合、温度が降下してもさしたる減少の傾向を示さず、ほぼ一定値をとるかにみえる。しかし、カオリンの不凍水量は、温度低下とともに明らかに減少していることがわかる。

図-3, 図-4の比表面積による Anderson または Dillon の実験式からの計算値を検討すると、標準砂の場合、熱量計による測定値(図-1)よりかなり小さな値となっているが、温度低下による減少の傾向は、明らかに示されている。カオリンについては、Anderson の式による値と Dillon の式による値とも、曲線と直線の相違はあるが、温度低下とともに不凍水量は減少している。しかし、熱量計による測定値(図-2)に比べ、小さい値となっている。このように、それぞれの測定値や計算値にかなりのばらつきがあり、いずれの値を真実の値とするか判断しがたいが、カオリンについては、2つの計算結果が比較的近似しており、BET 法による比表面積の測定法も信頼性が高いこと等を考慮すると、温度低下とともに不凍水量は減少するといえよう。

標準砂については、熱量計による測定値(図-1)とAndersonの実験式による計算値(図-2)が2桁程度異なっている。この原因として、①比表面積によるAndersonの実験式は、粘性土について適合し、砂には適用できないのではないか。これは、カオリンの比表面積が $18.51\text{ (m}^2/\text{g)}$ であるのに対し、標準砂が僅か $0.31\text{ (m}^2/\text{g)}$ であり、Anderson式の適用範囲として、比表面積 S が、 $0.02 \leq S \leq 800$ とされてはいるが⁴⁾、原文¹⁾では $\theta \sim W_u$ の関係として、 $\theta \geq -10^\circ\text{C}$ 、 $5 \leq S \leq 1\,000$ の範囲が明記されているので、砂には適用されないことがわかる。②標準砂の不凍水がきわめて小さいため、熱量計による測定が困難であること。以上2点が考えられる。しかし、不凍水の測定は、その絶対量より相対量が問題であるとするならば、測定値・計算値とも、不凍水量は温度低下とともに減少する傾向を示しているとい

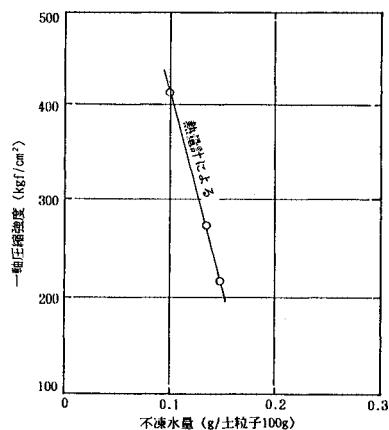


図-5 標準砂の一軸圧縮強度と不凍水量

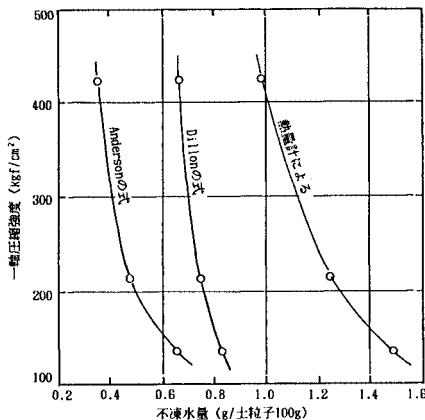


図-6 カオリンの一軸圧縮強度と不凍水量

える。

また、Anderson 式は -10°C 以上¹⁾、Dillon 式は -20°C 以上²⁾ の低温域について求められたものであるが、カオリンについては、 -20°C 以下の低温でも適用性があるとみられる。

(2) 不凍水量と一軸圧縮強度との関係

(1) 述べた不凍水量と温度との関係を一軸圧縮強度と温度との関係³⁾と結びつけ、不凍水量と一軸圧縮強度との関係を求めると、図-5、図-6 のような関係が得られる。標準砂、カオリンとも不凍水量が減少すると、一軸圧縮強度は増加している。この結果から、温度低下 \rightarrow 不凍水量減少 \rightarrow 一軸圧縮強度増加へと結論づけるには、さらに研究・検討を必要としても、氷の圧縮強度は $10 \sim 30 \text{ kgf/cm}^2$ と非常に小さいので⁵⁾、不凍水量が一軸圧縮強度にかなりの影響を与える因子の 1 つであるといえそうである。

また、高志らの「不凍水量が同じなら、砂凍土と粘土凍土の強度が同程度の大きさになる。」⁴⁾という結果には

ならないように見える。図-5 と図-6 からは、「同強度の砂凍土の不凍水量は粘土凍土の不凍水量より小さい。」という結果が得られており、本研究の結果からは、「不凍水量が同じ場合、砂凍土より粘土凍土の強度が大きくなる。」と推定されるからである。

4. むすび

本研究では -20°C 以下の低温域について、不凍水量と圧縮強度との関係について検討した結果、次のような結論が得られた。

(1) 凍土（標準砂、カオリン）の不凍水量は、温度低下とともに減少する。

(2) 不凍水量の減少に伴い、一軸圧縮強度は増加する傾向がみられる。

(3) 比表面積から不凍水量を求める Anderson および Dillon の実験式は、粘土（カオリン）については適合するが、砂（標準砂）については、良好な適合性はみられない。したがって、これらの式は粘土についての実験式である。

(4) これらの不凍水の算定式は、不凍水の絶対的値よりも、温度との相対的な値を示す。

(5) これらの式は、 -20°C 以下の低温域についても、ある程度の適合性が認められる。不凍水について、今後一層の実験研究が必要とされると思われる。

なお、不凍水の測定にあたっては、応用地質（株）大井部長のご教示を受け、比表面積の測定には、本学合成化学科大谷研究室のご援助を受けた。深く感謝申し上げる。

実験に協力していただいた群馬大学学生 松本 伸君（現・高崎市役所）を始め、土質研究室の諸君に謝意を表する。

参考文献

- 1) Anderson, D. M. and Tice, A. R. : Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements, U.S. Army Cold Regions Research and Eng. Laboratory, Highway Research, Record, No. 393, pp. 12~18, 1972.
 - 2) Dillon, H. B. and Andersland, O. B. : Predicting unfrozen water contents in frozen soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. III, No. 2, pp. 53~60, May 1966.
 - 3) 榎戸ほか： $-30^{\circ}\text{C} \sim -70^{\circ}\text{C}$ における凍土の一軸圧縮強度特性、土木学会第 40 回年次学術講演会概要集、1985.
 - 4) 高志ほか：均質な粘土凍土の一軸圧縮強度に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第 315 号、pp. 83~93, 1981 年 11 月。
 - 5) 木下誠一：凍土の物理学、森北出版、p. 11, 1982.
- (1986. 5. 8・受付)